

圧延設備駆動系の強度信頼性と設備診断システムの開発に関する研究

著者	井上 紀明
号	1630
発行年	1995
URL	http://hdl.handle.net/10097/10437

氏 名	井 上 紀 明
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 7 年 11 月 8 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 41 年 3 月 鉄鋼短期大学 (現 産業技術短期大学) 機械科短期大学
学 位 論 文 題 目	圧延設備駆動系の強度信頼性と設備診断システムの開発に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 坂 真澄

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

本章においては、わが国の鉄鋼業の圧延設備の推移を示し、製造技術の進歩に比べて設備技術の進歩が遅れたことを指摘した。具体的には、国内の厚板圧延機と連続式熱間圧延機的主要設備の駆動系の故障分析を示し、特に設備強度に起因する故障が多数発生していることを述べ、ミルスピンドル、ロールカップリング、減速機、ピニオンスタンドに集中していることを明らかにして、本研究の目的と意義を明確にした。

本研究の対象設備は、わが国の多くの圧延機に同様の問題が発生していた水島製鉄所の熱間圧延機に、主な焦点を当てた。その理由は、特に熱間圧延機で駆動系の設備トラブルが発生すると長時間の故障となるため、前工程である製鋼、連続鋳造工場および後工程である冷間圧延、表面処理工場の生産工程に影響を及ぼすからである。

対象設備の強度信頼性向上に関しては、設備投資額の観点で経済的に実現が不可能な場合があり、過負荷から回避するためのシャープピンによる保護装置が有効な場合がある。しかし、シャープピンの破断強度の信頼性が低く疲労析損によるトラブルが多発していたので研究対象に含めた。

さらに、使用中の設備に発見された疲労亀裂の進展予測による寿命推定に関する研究と、減速機やピニオンスタンドに使用されているころがり軸受のように疲労劣化型の機械要素については、設備診断技術が有効と考えられるので研究対象に加えた。

すなわち、

- (1) スピンドルとロールカップリングおよびローリネックの強度信頼性を向上させること。
- (2) 焼ばめ歯車の強度特性と破壊力学による寿命予測を行い、設備管理に反映させること。
- (3) シャープピンの信頼性を向上し、設備を安定的に操業できること。
- (4) AE 法と振動法による設備診断で、突発故障の未然防止の効果を研究すること。

などの研究を進め、圧延設備の信頼性を向上させることを目的とした。

第 2 章 高強度ミルスピンドルの開発

本章においては、スリッパタイプミルスピンドル (SJ) とクロスピンタイプユニバーサルジョイント (UJ) の強度特性を明らかにして、強度信頼性の高い SJ と UJ を具現化することと、SJ を UJ に置き換える場合の省エネルギー効果を調べた。

このために、SJ に関しては FEM による応力解析と試験体により応力測定の結果から旧 SJ の強度特性を調査し、強度

低下の大きな要因は、あり溝コーナの応力集中に起因していることを明らかにした。この対策として、応力集中の発生しない形状の新SJを考案し、新SJは旧SJの2倍の強度を有していることを、応力測定で検証した後に、実機への適応を図って、SJの割損事故を皆無した。

UJに関しては、強度不足に起因する割損事故が多かったクロスピンを主対象にし、強度計算方法を改良することと、フィレットレスのクロスピンを具現化することで1.5倍の強度向上を図った。また、使用中の腐食による疲労強度の低下を防止する目的で、防食方法を研究して決定し、UJの耐久性の向上を実現させた。

SJをUJに置き換える場合の省エネルギーの効果に関しては、継手部のメカニカルロスを解明するとともに試験体による伝達効率の測定実験を行い、両者の伝達効率の実験式を誘導して定量的評価を可能にした。また、実際の圧延機での省電力効果は5.7%であることを実証した。

第3章 小判型断面軸の強度評価方法

本章においては、圧延機のワークロール(WR)ネックの小判断面軸の強度特性を明らかにして、強度評価方法を確立することにより設備の強度設計の精度を向上させて、過剰な設備投資を抑止する目的で研究を行った。このため、対象部位のFEMによる応力解析と試験体による応力測定の結果から、応力集中率の評価計算式を誘導した。その結果、従来の応力集中の評価方法は過大評価していることを指摘するとともに、ロールネックの強度不足が原因で設備計画の推進が危ぶまれていた案件の推進を可能にして、ロールローテーションの制約を解除しロール原単価の向上も達成した。

第4章 焼ばめ歯車の強度特性と破壊力学による寿命予測

焼ばめ歯車の強度特性を明らかにして歯車リムの割損防止を図ることと、破壊力学による生産設備に発生した疲労亀裂の進展評価を行い、寿命予測の可能性を探った。また、破面観察から破壊事故発生時の負荷の予測の可能性も試みた。このため、焼ばめ歯車と一体歯車をFEMによる応力解析より比較し、両者の強度特性の差異を明らかにした。さらに、実際の設備に発生した疲労亀裂に対して破壊力学の亀裂進展予測を行い残存寿命を求め、その期間内で製作・取替を行い破壊事故を未然に防止した。また、割損事故が発生したロールカップリングの破面観察を行い、破壊力学を応用すれば事後発生時の作用応力の推定が可能であることを示した。

なお、焼ばめ歯車は、焼ばめによる円周方向の引張応力が歯底応力を高めるので、一体型歯車の設計を行い歯車リムの割損事故を回避すべきであることを提言した。また、焼ばめ歯車の歯底部の最大応力は、ルイスの曲げ応力と焼ばめ応力の代数和にほぼ一致することを明らかにした。

第5章 シャーピンの信頼性向上

本章においては、設備強度の向上策に限界が生じる場合に過負荷からの保護装置として設けられるシャーピンの強度特性を明らかにして、疲労析損の生じにくいシャーピンの具現化を図ることと、シャーピンの取替時間を短縮できるシャーピンカップリングの具現化について研究を行った。このため、シャーピンノッチ部の応力分布について解析を行うとともに、試験品によるせん断破壊実験を行い、せん断強さについて調査した。また、シャーピンの取替作業を観察して、取替に長時間を要する要因を調査した。

この結果、シャーピンが疲労析損する原因は、シャーピンのノッチ幅の関係で、せん断の荷重作用点が離れているためノッチ部に曲げ応力が発生するから生じることを明らかにした。なお、疲労析損を防止するには、ノッチ幅を狭くすることが重要であるとともに取付部の軸方向隙間を最小にすることが必要であることを明らかにした。また、シャーピンの取替時間を短縮できる新しい構造のシャーピンカップリングを考案して、実際の設備に適用し、疲労析損の回避と取替時間の短縮を可能にした。

さらに、せん断力はノッチ部の最小径部の最大せん断応力で決定されることを明らかにした。

第6章 AEによるころがり軸受診断技術

本章においては、振動法に比べてAE法の早期検出の優位性および振動法では診断が不可とされていた低速回転軸受の診断の可能性、ならびにAE法によるオンラインモニタリングシステムを適用する場合の診断論理とフィールドのノ

イズ性AEの除去方法を見出すことの研究を行った。このため、試験軸受を用いて、はく離損傷発生時のAEを観察することと、実機のフィールドAEを調査して両者の差異を明らかにした。

この結果、AE法はころがり軸受異常の早期検出に有効であること、低速回転軸受の診断をも可能にすることを明らかにした。はく離検出に200～500kHzの信号で、つば当たり検出には600kHzの信号で処理を行うのが診断精度の向上に有効である。AEのノイズ除去は、AE波の持続時間が50 μ sec.以下をノイズと見なして除去するのが有効で、汎用的に使える。生産設備へ応用する場合は、その設備特有のAE信号が発生していることがあるので、事前にフィールドAEを採取してノイズ除去の工夫が必要であることなどを明らかにした。

第7章 振動法による設備診断技術

本章においては、状態基準型保全（CBM）を指向した振動法による設備診断技術を、生産設備に適用して、故障の予知、突発故障の未然防止に有効であるかどうかを調査した。さらに、設備診断技術の効率化と経済効果についても追求した。

この結果、振動法による絶対値判定基準と相対値判定基準を提案するとともに、FFT解析と波型解析を活用すれば、損傷部位の特定が可能で故障の未然防止に有効であることを示した。また、単に故障診断のみならず、品質診断にも有効であることを、チャタマークの対策事例で示した。さらに、オンラインモニタリングシステムは、設備診断の業務効率向上と3K軽減効果が大きいことも示した。

一方、圧延機の駆動系に使われている軸受は、回転速度の加減速が激しく軸受の保持器が析損する事故が発生するので、保持器の断面性能を向上させなければならないことを指摘し、改善軸受と取替にて安定稼働を図った。

第8章 結 論

本章では、本研究で得られた結果を要約して述べている。また、設備管理に対する保全体制は設備の重要性と経済性を考慮して、事後保安（BM）、時間基準型保全（TBM）、状態基準型保全（CBM）を適宜に使い分けていくべきであることも言及した。

審 査 結 果 の 要 旨

本論文は厚板圧延機と連続式熱間圧延機の主要駆動系の主要な故障原因調査結果を基に、圧延設備駆動系の強度信頼性の向上並びに設備診断システムの開発を行ったもので全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章においてはスリッパタイプミルスピンドル(SJ)とクロスピンタイプユニバーサルジョイント(UJ)の強度特性を詳細な応力解析と実験により明らかにし、耐久性の飛躍的向上により強度信頼性の格段の向上に成功している。

第3章においては、圧延機のワークロール(WR)ネックの小判断面軸について、従来の応力集中係数の評価法の不備を指摘し新しい強度評価法を提案し、重力伝達部の強度設計の精度を飛躍的に向上させている。実用上有用な知見である。

第4章では大型歯車に発生した疲労き裂の進展を破壊力学的に評価し焼ばめ歯車と一体歯車の強度特性の差異を明らかにしている。特にそれぞれの歯底部の最大応力発生位置が異なる事等の新しい知見を基に、一体型設計による強度信頼性の向上を提案している。これは大型歯車の設計上重要な知見である。

第5章においては、過負荷からの保護装置として設けられるシャープピンの疲労強度特性について詳細に検討し、シャープピンノッチ部の応力分布について詳細な数値解析とせん断破壊実験を実施している。それにより疲労析損の原因は、ノッチ幅に起因するせん断荷重作用点が離れている事による曲げ応力の発生であることを解明し、析損防止には、ノッチ幅を狭くすることが有効であることを提案し、シャープピンの長寿命化を可能にし、設備の安定稼働を実現している。

第6章においては、AE法による低速回転軸受の診断可能性、ならびにモニタリングシステム開発における診断論理とフィールドのノイズ性AE法はころがり軸受異常の早期検出に有効であり低速回転軸受の診断も可能である事等を明らかにし、圧延設備へのAE法の実用化に成功している。

第7章においては、状態基準型保全(CBM)を指向した振動法による故障の予知、突発故障の防止への有効性について検討し、その結果、新たに絶対値判定基準を提案するとともに、損傷部位の特定にFFT解析と波型解析が極めて有効であることを示し、また品質診断にも有効であることをチャタマークの対策事例で示している。これらは有用な知見である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、圧延設備駆動系の強度信頼性の向上を設備診断システムの開発により実現し、設備診断技術に関しては重要な知見を得ており、材料強度学及び機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。